

УДК 772.96

А.Ю. Постыляков, Д.Л. Шварц, А.М. Михайленко

## Определение коэффициента излучения титановых сплавов BT1-0 и BT6 после нагрева при повышенных температурах

*Ключевые слова:* температура, титановые сплавы, коэффициент излучения, окалина, степень черноты, термография, термограмма.

Температура является одним из важнейших параметров процесса горячей деформационной обработки металлов и их сплавов. Ее огромное влияние на напряженно-деформированное состояние [1], энергосиловые параметры, а также формирование структуры и комплекса свойств [2, 3] металлических изделий обуславливает необходимость поиска как рациональных, научно обоснованных температурных режимов их пластической обработки, так и контроля температурного режима при реализации процесса на всех его стадиях.

Сказанным обусловлено большое разнообразие способов измерения температуры, применяемых в современной промышленности, которые можно разделить на контактные (с использованием термпар) и бесконтактные (с использованием пирометров и тепловизоров). Первые используют преимущественно в машинах и деталях инструментальной наладки (штампах, контейнерах и т.д.), что связано с рядом эксплуатационных особенностей, в частности, необходимостью обеспечивать постоянство контакта температурного датчика с поверхностью объекта [4], относительно большой инерционностью, обусловленной временем разогрева/охлаждения спая, что затрудняет измерение быстроизменяющихся температур, а также чувствительностью к различным видам помех, например, электромагнитным [5, 6]. Указанные особенности обуславливают использование контактных способов преимущественно в виде стационарных установок, осуществляющих измерение температуры в фиксированной точке объекта.

В тоже время, процессы обработки металлов давлением характеризуются значительным изменением формы и размеров изделий, а их температурное поле представляет куда больший интерес нежели отдельное «точечное» значение. Это делает бесконтактные методы измерения температуры, в особенности термографию, более предпочтительными при их исследовании и реализации.

Однако, для получения правильного результата при использовании процедур термографии необходимо знать две величины, характеризующие объект: коэффициент излучения поверхности  $\epsilon$  и отраженную кажущуюся температуру  $T_{ок}$ . И если вторая в большинстве случаев может быть принята равной температуре окружающей среды (или достаточно легко измерена посредством диффузионного отражателя), то коэффициент излучения является сложной функцией таких факторов, как материал, состояние поверхности, температура и т.д. Таким образом, его измерение для конкретных условий представляет собой актуальную задачу.

Суть достаточно большой группы методов [7, 8] определения коэффициента излучения состоит в измерении истинной температуры поверхности исследуемого объекта, получении посредством тепловизора изображения (термограммы), показывающего распределение кажущейся температуры поверхности, и обработке термограммы аппаратными (средствами самого тепловизора) или же программными средствами, а именно подборе значения  $\epsilon$ , обеспечивающего равенство истинной и кажущейся температуры. То есть, ключевым отличием различных методов является подход к определению истинной температуры.

Для этого в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18434-1 [9] в настоящем исследовании был применен метод с использованием образцового материала, который наносят на исследуемый объект перед выполнением термографической съемки, выдерживая некоторое время, необходимое для стабилизации температуры. Тогда, зная коэффициент излучения образцового материала, по термограмме определяют истинную температуру объекта в области нанесения материала. Далее, изменяя значение коэффициента излучения, добиваются совпадения кажущейся температуры поверхности в области нанесения материала с истинной.

Выполнение исследования коэффициента излучения титановых сплавов непосредственно при повышенных температурах, близких к температурам их горячей обработки, невозможно вследствие горючести применяемого образцового материала (черной тканевой изолянты с  $\epsilon = 0,95$ ). Использование же термостойких материалов затруднено, поскольку связано с необходимостью знать зависимость уже их коэффициента излучения от температуры в исследуемом диапазоне. Известно, что излучательная способность чрезвычайно сильно зависит от состояния поверхности, которая в случае горячей обработки титановых



сплавов представлена слоем различных оксидов. Поскольку состав, структура и толщина окисленного слоя зависят от условий нагрева [10], реализуя определенную комбинацию температуры и длительности выдержки, можно довести один и тот же сплав до определенного устойчивого состояния, которое в силу химической необратимости реакций образования оксидов, сохранится и после его охлаждения до комнатной температуры.

При этом стоит отметить, что первичная или печная окалина достаточно легко отделяется от поверхности металла при любом внешнем воздействии. Если при этом температура металла достаточно высока, происходит процесс формирования уже вторичной окалины. В процессе же деформационной обработки часть окалины «вкатывается» в поверхность, макро и микрогеометрические характеристики которой при этом непрерывно изменяются. Все это приводит к изменению коэффициента излучения и обуславливает большой разброс результатов даже для одного сплава, причем изменяется не только абсолютная величина значений, но и характер зависимости от температуры [11]. То есть, условия подготовки и проведения опытов оказывают значимое влияние на результат и по этой причине требуют подробного описания.

Для проведения исследования использовали образцы в виде плоских пластин размерами  $\approx 40 \times 30 \times 3$  мм, полученных резкой катанных полос из сплавов BT1-0 и BT6 [12]. Для удаления ранее окисленного поверхностного слоя образцы подвергали глубокой обдирке на заточном станке, после чего промывали в воде и обезжиривали растворителем.

Образцы последовательно помещали на подложку и помещали в печь, разогретую до заданной температуры, выдерживали в течение 1 часа, после чего извлекали подложку с образцом и охлаждали их на воздухе. В качестве исходной точки при планировании эксперимента была выбрана температура полиморфного превращения (ТПП), которая составляет приблизительно  $880^\circ\text{C}$  для BT1-0 и  $980^\circ\text{C}$  для BT6. Далее с шагом в  $25^\circ\text{C}$  назначили по 2 значения в большую и по 4-6 значений в меньшую сторону от указанных, получив интервал нагрева в  $775-925^\circ\text{C}$  для BT1-0 и  $825-1025^\circ\text{C}$  для BT6.

На рисунке 1а приведены фотографии образцов из сплава BT1-0 после нагрева и выдержки при температурах  $800$  и  $900^\circ\text{C}$ , а на рисунке 1б – из сплава BT6 при  $900$  и  $1000^\circ\text{C}$  соответственно. Видно, что цвет окалины различных сплавов титана существенно отличается, в том числе, в зависимости от температуры: от серого до песочно-желтого у BT1-0 и от бурого до графитового у BT6.



Рисунок 1. Фотографии образцов из сплавов BT1-0 (а) и BT6 (б), подвергнутых выдержке при температурах  $800$  и  $900^\circ\text{C}$ ,  $900$  и  $1000^\circ\text{C}$  соответственно



Структурно окалина на поверхности титана состоит из трех основных слоев: внешний слой представляет собой диоксид титана в одной из своих полиморфных модификаций – анатаза или рутила, средний слой – оксид титана (III)  $Ti_2O_3$ , внутренний слой – оксид титана (II)  $TiO$  [13]. Кроме этого, при определенных условиях, в частности – высоких температурах, возможно формирование большого количества разнообразных соединений: твердых растворов, смешанных оксидных фаз и ряда низших оксидов, например,  $Ti_3O_5$ . Также стоит отметить, что на строение и фазовый состав окалины существенно влияют и легирующие элементы, в особенности алюминий. Его наличие в составе сплава ВТ6 приводят к образованию фазы  $Al_2O_3$ , которая вместе с  $TiO_2$  представляет собой составляющие внешнего слоя окалины [14]. Образование обозначенных фаз визуально и наблюдается в виде изменения цвета оксидной пленки [15]. Таким образом, хотя коэффициент излучения напрямую не зависит от цвета, изменение последнего свидетельствует прежде всего об изменении структуры и фазового состава окалины, которые и влияют на коэффициент излучения поверхности.

Стоит также отметить, что при высоких (выше 700°C) температурах скорость окисления подчиняется линейному закону, а толщина слоя окалины непрерывно увеличивается за счет диффузии кислорода через трещины и поры [16]. Соответственно, возможно наличие зависимости коэффициента излучения и от времени выдержки, что может являться предметом дальнейших исследований.

Стоит отметить, что на некоторых образцах при охлаждении происходило интенсивное растрескивание окалины (см. рис. 1а), сопровождающееся отслоением от поверхности отдельных ее фрагментов. В местах отслоения можно наблюдать поверхность исходного металла, сохранившую свой металлический блеск. Коэффициент излучения обозначенных участков существенно меньше. Само же отслоение окалины происходит вследствие значительного отличия коэффициентов температурного расширения металла и окалины, а также хрупкости и пористости последней [16]. Съемку выполняли тепловизором FLIR SC660 отдельно для каждого образца в виде серии из 10-ти снимков, сделанных по мере остывания образца с 80 до 60°C. Полученные термограммы обрабатывали с использованием ПО FLIR ResearchIR в соответствии с вышеописанным принципом.

На рисунке 2 приведен фрагмент термограммы образца из сплава ВТ1-0, подвергнутого выдержке при температуре 775°C. Образцовый материал нанесен на его правую часть, которая, как видно из рисунка, имеет большую кажущуюся температуру. Среднее значение последней для обозначенной области Ar1 (границы выделены сплошной линией), снятой при  $\epsilon = 0,95$ , составляет  $T_{к1} = 73,0^\circ\text{C}$ , что можно считать истинным значением  $T_{и}$ . В то же время для смежной (без образцового материала) области Ar2 кажущаяся температура равна  $T_{к2} = 57,1^\circ\text{C}$  (абсолютное и относительное отклонения равны  $\Delta = 15,9^\circ\text{C}$  и  $\delta = 22\%$  соответственно). Подбор значения коэффициента излучения, обеспечивающего  $\Delta = 0,1^\circ\text{C}$ , дает значение  $\epsilon = 0,61$ . Остальные термограммы были обработаны аналогично.

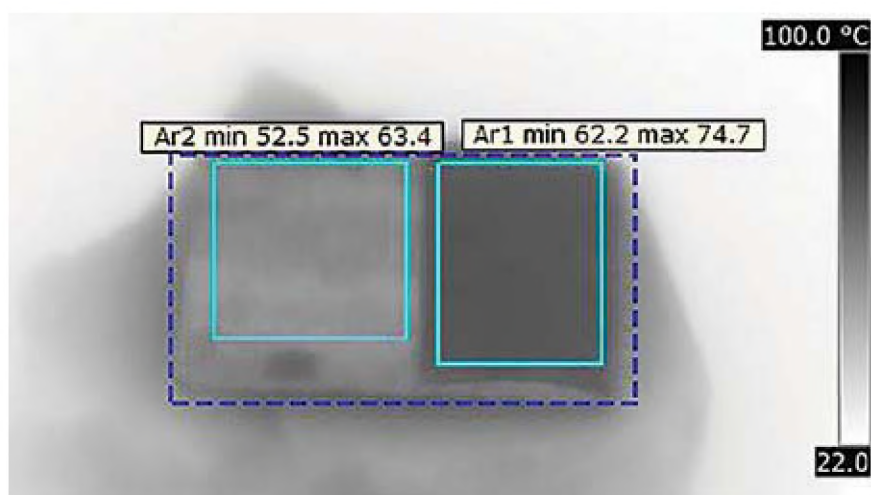


Рисунок 2. Фрагмент термограммы образца (границы выделены пунктиром) из сплава ВТ1-0, подвергнутого выдержке при температуре 775°C

На рис. 3 приведен график зависимости коэффициента излучения сплавов ВТ1-0 и ВТ6 от температуры предшествующего нагрева. Опытные данные представлены единичными маркерами. Для большей наглядности отображения выполнена их аппроксимация рациональными функциями, которые показаны пунктиром.



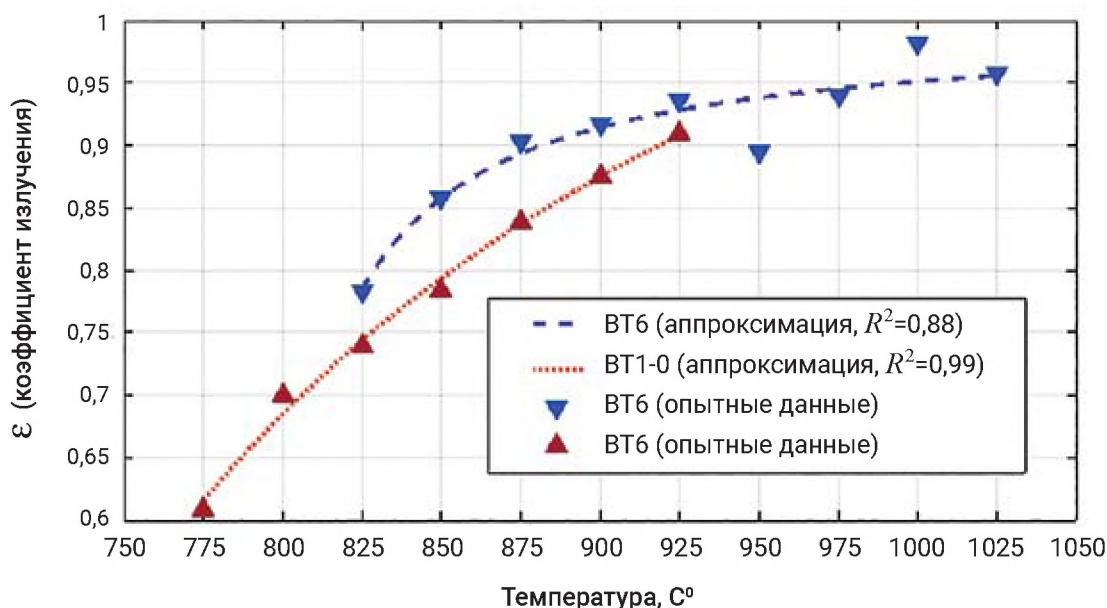


Рисунок 3.

**Зависимость коэффициента излучения сплавов ВТ1-0 и ВТ6  
от температуры предшествующего нагрева**

Из графика следует, что с увеличением температуры нагрева коэффициент излучения обоих сплавов имеет тенденцию к увеличению во всем исследуемом интервале, соответственно его большее значение соответствует большей температуре. Некоторый разброс значений относительно кривой аппроксимации (точки при температурах 950 и 1000°C для ВТ6) может быть связан с отслоением окалины от поверхности металла при сохранении ее внешней целостности и, как следствие, изменением интенсивности теплопередачи излучением. Также причинами могут быть неравномерность нагрева образца или неплотное прилегание образцового материала.

Стоит отметить, что даже в области высоких температур характер зависимости не приобретает асимптотический вид по отношению к оси ординат, следовательно, коэффициент излучения при проведении экспериментальных или теоретических (моделировании) исследований необходимо выбирать исходя из фактической температуры нагрева. Его же дальнейшее изменение в процессах пластической обработки может являться предметом отдельного исследования.

Также видно, что коэффициент излучения сплава ВТ6 больше, чем у ВТ1-0 для равных температур, что связано с ранее описанными особенностями строения их окисной пленки. В среднем различие составляет 0,045 и проявляет тенденцию к уменьшению с увеличением температуры. Так, наименьшее отличие в 0,025 соответствует температуре 925°C, а наибольшее в 0,072-850°C. И хотя отличие на первый взгляд кажется несущественным, при проведении реальных измерений ошибка может составлять десятки градусов [17].

Таким образом, с использованием метода образцового материала были определены значения коэффициента излучения  $\varepsilon$  сплавов ВТ1-0 и ВТ6, подвергнутых окислению при повышенных температурах, характерных для их горячей пластической обработки. Выявлено, что зависимость коэффициента излучения от температуры для обоих сплавов имеет вид монотонно возрастающей функции, что связано с фазовым и структурным составом окисной пленки. Полученные данные могут быть использованы при проведении термографических исследований процессов нагрева и обработки выбранных сплавов в лабораторных и промышленных условиях, а также при их математическом моделировании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loginov Yu.N. Effect of process isothermy on a stress-strain state during rolling of bars from titanium alloy / Yu.N. Loginov, A. Yu. Postylyakov, Yu.V. Inatovich // *Tsvetnye Metally*. 2018. № 9. pp. 71-76.  
<https://doi.org/10.17580/tsm.2018.09.11>
2. Illarionov A.G. Effect of heating temperature on the formation of structure and phase composition of a biocompatible alloy Ti-6Al-4V-ELI subjected to equal-channel angular pressing / A.G. Illarionov, N.V. Shchetnikov, S.M. Illarionova, A.A. Popov // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. V. 118. Issue 3. pp. 272-278.  
<https://doi.org/10.1134/S0031918X1703005X>



3. Зарипова Р.Г. Влияние интенсивной пластической деформации и режимов обработки на структуру и механические свойства титанового сплава ВТ6 / Р.Г. Зарипова, В.А. Шундалов, А.В. Шарафутдинов, В.Д. Ситдинов, И.В. Кандаров, В.В. Латыш, Н.Г. Зарипов, И.В. Александров // Вестник УГТАУ. 2012. Т. 16. № 7 (52). С. 17-24.
4. Кузнецов В.Г. Численная оценка погрешности измерения температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала / Г.В. Кузнецов, К.М. Мухамадеев // Известия Томского политехнического университета. 2009. № 4. С. 12-16.
5. Peter R.N. Childs. Practical Temperature Measurement. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. pp. 368.
6. Богданович П.Н. Методы регистрации температуры при трении и механической обработке твердых тел / П.Н. Богданович, Д.В. Ткачук, В.М. Белов // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 4. С. 444-456.
7. Минкин Д.А. Экспериментальное исследование степени черноты металлических образцов / Д.А. Минкин, В.А. Кораблев, А.В. Шарков // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 1. С. 18-23.
8. Ерпалов М.В. Анализ температурных условий процесса высадки концов труб / М.В. Ерпалов, А.А. Богатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т.16. № 1. С. 98-105. <https://doi.org/10.14529/met160114>
9. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Общие методы. М.: Стандартинформ. 2013. – 35 с.
10. Bertrand G. Morphology of Oxide Scales Formed on Titanium / G. Bertrand, K. Jarraya, J.M. Chaix // Oxidation of Metals. 1983. V. 21. № 1. pp. 1-19.
11. Теплофизические свойства титана и его сплавов: справочник / В.Э. Пелецкий, В.Я. Чеховской, Э.А. Бельская и др. М.: Металлургия, 1985. – 103 с.
12. Экспериментально-теоретическое исследование свободного уширения титанового сплава ВТ6 / А.Ю. Постыляков, Д.Л. Шварц, А.М. Михайленко // Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2019». Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. С. 97-99.
13. Gemelli E. Thermal Characterization of Commercially Pure Titanium for Dental Applications / E. Gemelli, A. Scariot, N. Heriberto A. Camargo // Materials Research. 2007. Vol. 10, №. 3. pp. 241-246.
14. Du H.L. Air oxidation behaviour of Ti-6Al-4V alloy between 650 and 850° / H.L. Du, P.K. Datta, D.B. Lewis, J.S. Burnell-Gray // Corrosion Science. 1994. V. 36. Issue 4. pp. 631-642.
15. Коршунов А.В. Особенности окисления субмелкокристаллического титана при нагревании в воздухе / А.В. Коршунов, А.П. Ильин, А.И. Лотков, И.В. Раточка, Т.П. Морозова, О.Н. Лыкова // Известия Томского политехнического университета. Серия «Химия». 2011. Т. 319. № 3. С. 10-16.
16. Guleryuz H. Oxidation of Ti-6Al-4V alloy / H. Guleryuz, H. Cimenoglu // Journal of Alloys and Compounds. 2009. V. 472(1). pp. 241-246.
17. Прошкин С.С. К вопросу от точности измерения температуры с помощью тепловизора / С.С. Прошкин // Вестник МАХ. 2014. № 1. С. 51-54.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОСТЫЛЯКОВ Александр Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
E-mail: [a.i.postyliakov@urfu.ru](mailto:a.i.postyliakov@urfu.ru)

**ШВАРЦ Данил Леонидович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
E-mail: [d.l.shvartc@urfu.ru](mailto:d.l.shvartc@urfu.ru)

**МИХАЙЛЕНКО Аркадий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
E-mail: [am\\_plus@mail.ru](mailto:am_plus@mail.ru)